

ISABELLA FERRARA <sup>(1)(\*)</sup>,  
ANNA ABITA <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> *Dipartimento Regionale  
Ambiente - Assessorato Regionale  
del Territorio e dell'Ambiente –  
Regione Siciliana, via Ugo La Malfa  
n. 169, 90146 Palermo*

<sup>(2)</sup> *ARPA Sicilia - Direzione  
Generale, via San Lorenzo n.312/a,  
90146 Palermo*

<sup>(\*)</sup> *isabella.ferrara@regione.sicilia.it*

Le emissioni di particolato fine dal settore dei trasporti navali ed impatto sulla qualità dell'aria nelle zone costiere. Effetti della sostituzione di oli combustibili pesanti con combustibili a basso tenore di zolfo

**Riassunto** - Le emissioni derivanti dal traffico navale influenzano in modo significativo la qualità dell'aria delle zone costiere con un impatto significativo sulla salute umana. Al fine di ridurre le emissioni da navi la Direttiva 2005/33/CE ha imposto a tutte le navi ormeggiate o ancorate nei porti europei di utilizzare combustibili con un tenore di zolfo inferiore a 0,1% in peso. Il presente lavoro raccoglie i dati della letteratura più recenti relativamente agli effetti sulle emissioni dal settore navale, sulla qualità dell'aria e sulla salute derivanti dall'introduzione di combustibili a basso tenore di zolfo. La sostituzione di oli combustibili pesanti con carburanti a basso contenuto di zolfo comporta una forte riduzione delle emissioni di SO<sub>2</sub>, di particolato (PM), di composti organici e di metalli. Tuttavia, alcuni studi hanno evidenziato che l'uso di combustibili a basso tenore di zolfo può comportare emissioni di PM costituite principalmente da piccole particelle (<100 nm) e con un contenuto più elevato di carbonio elementare.

**Parole chiave:** qualità dell'aria, emissioni, particolato fine, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, salute, navi, porti, zone costiere

**Particulate matter emissions from shipping sector and impact on air quality in coastal area. Effect of the replacement of heavy fuel oil with low sulphur fuels.**

**Summary** - Ship emissions significantly affect the concentration in atmosphere of several important pollutants and human health with impacts concentrated in coastal regions. In order to reduce ship emissions, European law requires all ships at berth or anchorage in European harbours to use fuels with a sulphur content of less than 0.1% by weight.

This short review summarizes the main studies devoted in the last years to evaluate the effect of the introduction of marine fuels with low sulphur content on ship emissions, coastal air quality and health. It has been reported that the replacement of heavy fuel oils with fuels with low sulphur content allows a strong reduction of SO<sub>2</sub>, particulate matter (PM), organic compounds, metals emissions. However, some studies have highlighted that the use of diesel fuels can result in PM emissions mainly constituted of small particles (< 100 nm) and with a higher content of elemental carbon.

**Keyword:** air quality, emissions, particulate, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, health, ship, harbour, coastal regions

## INTRODUZIONE

Le emissioni derivanti dal traffico navale influenzano in modo significativo la qualità dell'aria delle aree marine e delle zone costiere. Le navi emettono infatti gli inquinanti tipici dei processi di combustione, quali  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{COV}$  e particolato. Le emissioni da navi hanno un impatto oltre che sulla qualità dell'aria anche sull'effetto serra, sulle piogge acide e soprattutto sulla salute umana [1-6]. Il contributo del trasporto navale alle emissioni globali di  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_2$  è stato stimato rispettivamente pari a circa il 15% e 5-8%, [7, 8]. Le emissioni complessive di  $\text{PM}_{10}$  dal settore del trasporto marittimo sono state stimate da Yan e al. [9] pari a  $1.4 \text{ Tg y}^{-1}$  per il 2010 comparabili alle emissioni dal traffico veicolare su strada ( $1,5 \text{ Tg y}^{-1}$ ). Inoltre, il trasporto marittimo internazionale è responsabile di circa 2-3% delle emissioni globali di gas a effetto serra. Le emissioni dipendono da molteplici parametri, quali composizione del combustibile, tipo, potenza e carico di utilizzo del motore.

Si stima che circa il 70% delle emissioni delle navi avvenga entro 400 km dalla terraferma [10], ciò comporta un contributo significativo del trasporto marittimo alla qualità dell'aria nelle zone costiere, accentuato dal fatto che i motori principali spesso non vengono spenti nella fase di ormeggio per garantire la produzione di energia per i servizi [11]. Le emissioni derivanti dalle navi sono responsabili di circa 60.000 decessi annuali su scala globale con impatti concentrati sulle regioni costiere [2]. Si stima nei prossimi anni un aumento dei trasporti navali [12, 13] ed un conseguente aumento delle emissioni di gas serra, inquinanti gassosi e particolato e dell'impatto del settore sulla qualità dell'aria e sulla salute [1].

Negli ultimi anni diversi autori hanno proposto misure per ridurre le emissioni derivanti dal trasporto navale, tra cui:

1. sostituzione del combustibile per navi con combustibili a basso contenuto di zolfo [14],
2. sviluppo di navi a gas naturale liquefatto [15],
3. elettrificazione delle banchine dei porti [16],
4. applicazione di tecnologie di riduzione degli  $\text{NO}_x$ , come il ricircolo dei gas di scarico e la riduzione catalitica selettiva.

A partire dal 2005, secondo l'allegato VI del protocollo MARPOL 1997 (Regolamento dell'organizzazione marittima internazionale (IMO)), alcune regioni hanno fissato aree a controllo delle emissioni (ECAs) (Fig. 1). In queste aree è stata applicata una progressiva riduzione del contenuto di zolfo nei combustibili navali. Secondo il Regolamento IMO, nelle aree ECA, il tenore di zolfo deve essere pari a 0,1% (m/m), mentre nelle aree non-ECAs il contenuto poteva essere 3,5% (m/m) prima del 2020 e del 0,5% (m/m) dopo il 2020.



**Fig. 1 - Aree a controllo delle emissioni secondo il regolamento dell'organizzazione marittima internazionale (IMO) - Protocollo MARPOL 1997**

La Direttiva 2012/33/CE che modifica la direttiva 1999/32/CE, relativa al tenore di zolfo dei combustibili per uso marittimo, impone, rifacendosi all'Allegato VI del regolamento Marpol che:

- non siano utilizzati combustibili per uso marittimo con un tenore di zolfo superiore in massa al 3,50%, a eccezione dei combustibili destinati all'approvvigionamento delle navi che utilizzano i metodi di riduzione delle emissioni con sistemi a circuito chiuso;
- non siano immessi sul mercato oli diesel marini se il loro tenore di zolfo è superiore in massa all'1,50%;

Exhaust component	EF, g kWh <sup>-1</sup>	EF, g (kg fuel) <sup>-1</sup>	Er, kg h <sup>-1</sup>	C, g Nm <sup>-3</sup>
NO <sub>x</sub>	14.22	73.4	241.7	2.20
CO <sub>2</sub>	667	3441	11 339	103.1
CO	0.42	2.17	7.1	0.065
HC	0.07	0.36	1.2	0.011
O <sub>2</sub>	1270	6553	21 590	196.3
SO <sub>2</sub>	7.62	39.32	129.5	1.18
SO <sub>3</sub>	0.11	0.57	1.9	0.017
Benzene	0.012	0.06	0.21	0.002
PM	0.29	1.49	4.86	0.044
PM <sup>a</sup>	1.03	5.31	17.43	0.158
OC <sup>a</sup>	0.30	1.58	5.15	0.047
EC <sup>b</sup>	0.02	0.13	0.42	0.004
Ash <sup>b</sup>	0.19	0.98	3.19	0.029
Sulphate <sup>a</sup>	0.15	0.76	2.47	0.022

<sup>a</sup> After cooling in the dilution system.

<sup>b</sup> Average hot exhaust and diluted exhaust.

**Tab. 1 - Fattori di emissione (EF), velocità di emissione (Er) e concentrazione (C) di inquinanti gassosi e particolato nelle emissioni da motori alimentati ad oli combustibili pesanti (HFO). (Fonte Moldanova e co-autori [18]).**

- le navi all'ormeggio nei porti dell'Unione non utilizzino combustibili per uso marittimo con tenore di zolfo superiore in massa allo 0,1%, accordando all'equipaggio tempo sufficiente per completare le necessarie operazioni per il cambio del combustibile il più presto possibile dopo l'arrivo all'ormeggio e il più tardi possibile prima della partenza.

Gli Stati membri devono inoltre vietare, dal 1 gennaio 2020, l'utilizzo di combustibile per uso marittimo con un tenore di zolfo superiore all'1,50% in massa dalle navi passeggeri che effettuano servizio di linea da o verso porti dell'Unione europea, transitando nelle acque territoriali, zone economiche esclusive e zone di controllo dell'inquinamento che non rientrano nelle aree di controllo delle emissioni di SO<sub>2</sub>. Pertanto, le navi operanti nel Mar Mediterraneo, seppur non ancora compreso tra le aree ECA, sono soggette, all'interno delle aree portuali, ad utilizzare combustibili con gli stessi limiti di contenuto di zolfo.

La Direttiva è stata recepita nel nostro ordinamento con D.Lgs. 112/2014 e la qualità dei combustibili ad uso marittimo è regolamentata dall'art. 295 del D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.

Una riduzione del contenuto di zolfo nel carburante comporta, oltre alla riduzione delle emissioni di SO<sub>2</sub> anche una riduzione delle emissioni di particolato

(PM). Nel presente lavoro verranno riportati gli studi recenti riguardanti l'impatto della sostituzione dei combustibili ad alto tenore di zolfo con combustibili a basso contenuto di zolfo sulle emissioni dal settore navale e sulla qualità dell'aria nelle zone costiere. Verranno inoltre riportati brevemente i dati stimati nell'Inventario Regionale delle Emissioni sul contributo del settore dei trasporti navali sulle emissioni complessive nelle aree costiere del territorio della Regione Siciliana e le previsioni del Piano di Tutela della Qualità dell'Aria, approvato con Deliberazione della Giunta Regionale n. 268 del 18 luglio 2018, per la riduzione delle emissioni NO<sub>x</sub> e PM<sub>10</sub> dalle navi nelle fasi di stazionamento nei porti presenti nelle zone dove sono stati registrati superamenti dei valori limite fissati dalla Direttiva 2008/50/CE.

## INFLUENZA DEL COMBUSTIBILE SULLE EMISSIONI DAL SETTORE NAVALE

Le crisi petrolifere degli anni '70 e il conseguente aumento del prezzo del petrolio avevano comportato uno spostamento dei carburanti marini dai distillati medi della raffineria di petrolio greggio, come il diesel marino (MDO) o il gasolio marino (MGO), verso oli combustibili pesanti (HFO), ottenuti dal residuo della distillazione vacuum miscelato con prodotti di raffineria più leggeri, come il cherosene. Gli oli combustibili pesanti (HFO), sono caratterizzati da alte concentrazioni di zolfo e dalla presenza di metalli pesanti. Recentemente Zhang e al. [17] hanno effettuato misurazioni degli inquinanti emessi da 12 diverse barche da pesca in Cina calcolando i fattori di emissione medi per i principali inquinanti emessi (CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, PM e SO<sub>2</sub>). Un ampio studio sulla composizione delle emissioni da una nave da carico di grandi dimensioni alimentata con HFO è stato riportato da Moldanova e co-autori nel 2009 [18]. I fattori di emissione e le concentrazioni di un certo numero di composti misurati nelle emissioni sono riportati nella Tab. 1. Gli autori hanno

Sample	Benzene	Toluene	Butyl-acetate	Octane	Ethyl-benzene	m + p-Xylene	o-Xylene	Nonane
1	0.19	0.15	0.34	0.02	0.05	0.26	0.06	0.02
2	0.18	0.13	0.12	0.01	0.04	0.11	0.04	0.01
3	0.13	0.10	0.04	0.01	0.03	0.10	0.04	0.01
Average	0.17	0.13	0.17	0.01	0.04	0.16	0.05	0.01

**Tab. 2 - Concentrazione di alcune sostanze organiche volatili misurate da Moldanova e co-autori nel 2009 nel gas esausto provenienti da motori diesel alimentati ad oli combustibili pesanti (HFO) {18}**

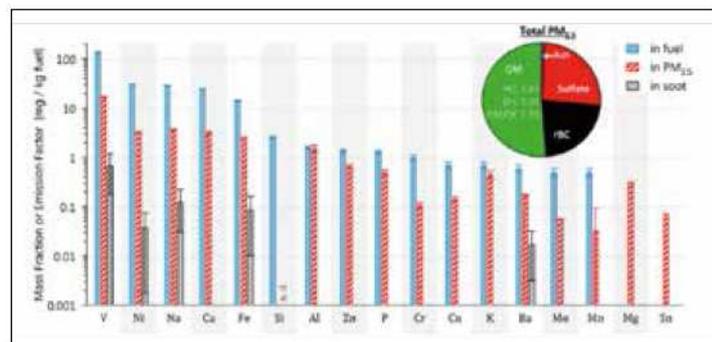
quantificato anche vari composti organici, tra cui benzene, toluene e o, m e p-xilene, rilasciati in atmosfera (Tab. 2).

Gli oli combustibili pesanti (HFO) contengono anche vari metalli che possono essere rilasciati in atmosfera come materiale particolato. Popovicheva e al. [19] hanno mostrato che i metalli di transizione e i metalli alcalino-terrosi (V, Ni, Ca e Fe) e le loro forme solubili o insolubili (ossidi, solfati, solfuri, carbide) contenuti negli oli combustibili pesanti sono rilasciati in atmosfera con il particolato.

In un recente studio, Corbin e al. [20] hanno quantificato i principali metalli presenti nell'olio combustibile pesante (HFO), nel particolato fine  $PM_{2.5}$  e nel nerofumo (soot) emesso da un motore diesel (Fig. 2). Gli elementi più abbondanti nel combustibile sono risultati V, Ni, Na, Ca e Fe; mentre i fattori di emissioni sono risultati generalmente compresi tra 2 e 10 mg per kg di combustibile nel  $PM_{2.5}$  e tra 0.1 e 1 mg per kg di combustibile nel nerofumo.

La transizione dai combustibili pesanti tradizionali ai combustibili marini a basso contenuto di zolfo a seguito dei limiti fissati nelle aree a controllo delle emissioni (ECAs) e a seguito della emanazione della Direttiva 2012/33/CE, ha comportato una variazione della concentrazione di particolato, zolfo, vanadio e nichel nelle emissioni provenienti dalle navi.

Diversi studi [14, 21, 22] condotti in varie regioni e su navi di tipologia differente hanno mostrato che la sostituzione del combustibile ad alto tenore di zolfo con uno a basso tenore di zolfo comporta una riduzione del fattore di emissione del 80-97% per  $SO_2$ , del 65-90% per il materiale particolato totale e del 40% per



**Fig. 2 - Composizione degli elementi in traccia nel combustibile HFO (frazione di massa), e nel  $PM_{2.5}$  e nerofumo (fattore di emissione) (fonte Corbin e al, 2018 {20}).**

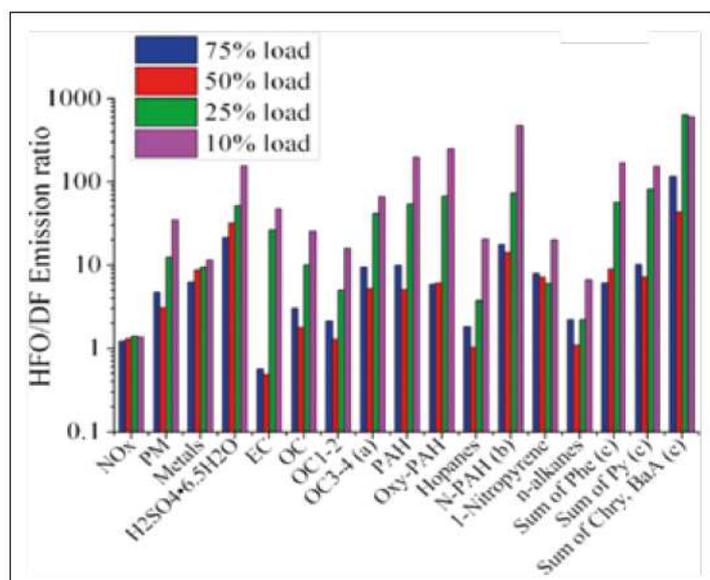
i composti aromatici, mentre non sono state osservate variazioni significative del fattore di emissione per gli  $NO_x$  [23, 24].

Alcuni studi [21, 22, 25 e 26] hanno mostrato che il numero delle particelle emesse rimane pressoché costante, con un aumento delle nanoparticelle e una riduzione di quelle di grandi dimensioni. Jonsson e coautori [25] hanno mostrato che la maggior parte delle particelle prodotte da motori alimentati a combustibili a basso tenore di zolfo aveva diametro aerodinamico inferiore a 100 nm e spesso una distribuzione unimodale con un picco che si posiziona intorno ai 35 nm.

Inoltre, lo studio condotto da Zetterdahl e al. [22] ha evidenziato che l'uso di combustibili a basso tenore di zolfo comporta un aumento delle emissioni di composti aromatici e poliaromatici (IPA) leggeri e una riduzione di IPA a più alto peso molecolare presenti nel particolato.

Streibel e co. [27] e Sippula e co. [23] hanno osservato che l'uso di combustibili marini a basso tenore di zolfo, pur riducendo le emissioni della maggior parte delle sostanze indagate può comportare in condizioni di carico medio ed elevato un

aumento dell'emissione di carbonio elementare (Fig. 3).



**Fig. 3. Confronto tra le emissioni derivanti da combustibili ad alto e basso tenore di zolfo in vari regimi di carico del motore (fonte Sippula e al. in 2014 [23]).**

### TRACCIANTI CHIMICI PER LA VALUTAZIONE DEL CONTRIBUTO DELLE EMISSIONI DA NAVI SULLA QUALITA' DELL'ARIA

In accordo con la letteratura [1, 28, 29, 30], i tipici traccianti per valutare il contributo delle emissioni del settore navale sulla qualità dell'aria nel caso di combustibili marini costituiti da oli combustibili pesanti ad alto tenore di zolfo (HFO) sono il Vanadio (V) e il Nickel (Ni) in quanto presenti in concentrazioni significative nel combustibile [30]. Alcuni studiosi hanno proposto di utilizzare anche altri traccianti come Th, Pb, Zn e solfati [31].

Poiché molte di queste sostanze possono essere rilasciate anche da altre fonti (raffinerie, impianti di produzione di energia e diversi altri processi industriali aventi unità di combustione), al fine di individuare il contributo delle emissioni prodotte dal traffico marittimo sui valori misurati per il monitoraggio della qualità dell'aria in aree

costiere o in prossimità dei porti, è stata posta l'attenzione sul rapporto tra le concentrazioni di V e Ni che per le emissioni da motori navali alimentati con oli combustibili pesanti (HFO) presenta dei valori caratteristici compresi tra 2 e 4; in letteratura sono riportati i seguenti valori per il rapporto tra le concentrazioni di V e Ni: 2.3-4.5 [30, 32],  $3.2 \pm 0.8$  [33] e  $4 \pm 1$  [28]. In uno studio condotto tra il 2004 e il 2008 di caratterizzazione del particolato nell'isola di Lampedusa Becagli e al. [29] hanno evidenziato che nell'aerosol proveniente dalle navi l'80% del Ni e del V è presente nella forma solubile contro circa il 40% proveniente dal particolato di origine crostale. Gli stessi autori hanno evidenziato rapporti elevati di Ni e V rispetto al Si nell'aerosol proveniente dal traffico marittimo valori di  $V_{sol} > 6 \text{ ng m}^{-3}$ . Pandolfi e coautori [34] hanno rilevato, oltre a un rapporto tra le concentrazioni di V e Ni di circa 3, un rapporto tra La e Ce compreso tra 0.6 e 0.8.

Alla luce della tendenza in atto di cambio dei combustibili ad alto tenore di zolfo con combustibili diesel a basso tenore di zolfo, diversi studi hanno rilevato che i traccianti utilizzati per gli oli combustibili pesanti non possono essere utilizzati anche nel caso di combustibili diesel. Ad esempio, Xiao e coautori nel 2018 [42] hanno pubblicato un lavoro sulle emissioni delle navi nel porto di Jingtang, dove era previsto l'uso di diesel con un contenuto di zolfo inferiore al 5%. Gli autori hanno concluso che le concentrazioni di Vanadio per la maggior parte delle navi erano inferiori o comparabili ai valori ambientali. Risultati simili sono stati riportati da Blasing e coautori nel 2016 [43]. Questi autori hanno mostrato che il rapporto V/Ni era molto diverso da quello atteso per la combustione di oli combustibili pesanti (HFO) e simile a quello rilevato per il traffico su strada. Diversi autori hanno quindi proposto l'utilizzazione di traccianti differenti come i dimetilfenantreni [43], i policicloalcani C20 – C39 contenuti negli oli lubrificanti utilizzati per i motori marini [44].

### IMPATTO DEL TRASPORTO MARITTIMO SULLA QUALITÀ DELL'ARIA

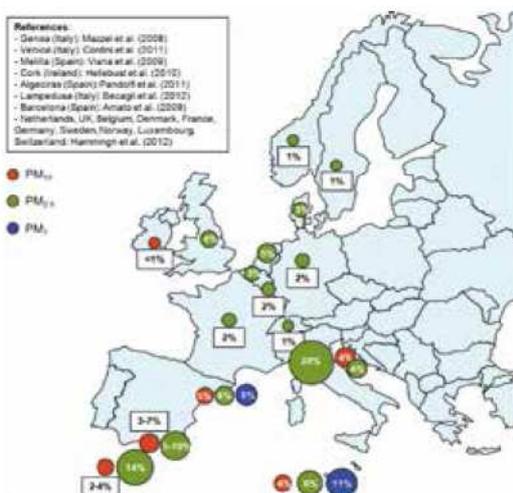
Viana e coautori [31] hanno pubblicato nel 2014 una raccolta dei dati di letteratura per la stima del contributo delle emissioni derivanti dal trasporto marittimo sulla qualità dell'aria in zone costiere per quanto riguarda sia il particolato ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  e  $PM_1$ ) (Fig. 4) sia gli inquinanti gassosi  $NO_2$  e  $SO_2$  (Fig. 5). Secondo questo studio, le emissioni prodotte dalle navi contribuiscono alle concentrazioni medie annue di particolato in aria per circa 1-7% per il  $PM_{10}$ , 1-14% per il  $PM_{2.5}$  (raggiungendo un massimo estivo del 20% a Genova) e l'11% per il  $PM_1$  (Fig. 4).

Per il  $PM_1$ , lo studio pubblicato da Becagli e coautori nel 2012 [29], riguardava soltanto la località di Lampedusa ed evidenziava che le emissioni delle navi contribuivano a circa il 3.9 % del  $PM_1$  e al 11 % sia del  $PM_{2.5}$  che del  $PM_{10}$ .

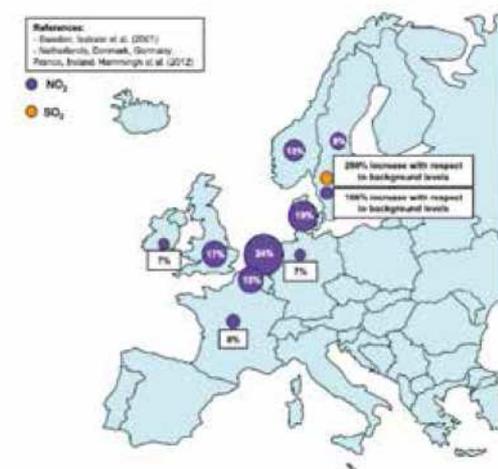
Il contributo delle navi alle concentrazioni ambientali di  $NO_x$  è stato stimato da diversi autori compreso tra il 7% e il 24% (Fig. 5).

A livello comunitario le linee guida per la redazione degli inventari delle emissioni (EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019) riportano, nella tabella 2-2 della sezione 1.A.3.d (Tab. 3), i range del contributo dal settore navale sulle emissioni complessive nazionali per diversi inquinanti.

Diversi studi hanno cercato di quantificare l'effetto della sostituzione del combustibile ad alto tenore di zolfo (HFO) con combustibili diesel a basso tenore di zolfo sull'impatto del trasporto navale sulla qualità dell'aria nelle zone costiere e nei porti. È stata stimata un'importante riduzione del contributo alla concentrazione di  $SO_2$  (42% [35], 66% [24], 90% [31], 28-72% [36]) e del particolato (30-52 % per il  $PM_{2.5}$  [37], 67 % per  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$  [31]) mentre una variazione poco rilevante è stata stimata per  $NO_x$  e carbon black [24, 38]. In particolare, in accordo con Tao e coautori [36], la diminuzione per il particolato è



**Fig. 4 - Contributo delle emissioni da trasporto marittimo sulla qualità dell'aria costiera - particolato ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  e  $PM_1$ ).** (fonte: Viana e al., 2014 [31])



**Fig. 5 - Contributo delle emissioni da trasporto marittimo sulla qualità dell'aria costiera – Inquinanti gassosi ( $NO_2$  e  $SO_2$ ).** (fonte: Viana e al., 2014 [31])

**Tab. 3: Contributo del settore navale alle emissioni totali (%) (Fonte EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019)**

INQUINANTE	Contributo del settore navale alle emissioni totali (%)
$SO_2$	0-80
$NO_x$	0-30
COVNM	0-5
CO	0-18
$PM_{10}$	0-4
$PM_{2.5}$	0-5

**Tab. 4: Merci imbarcate e sbarcate (migliaia tonnellate/anno) dai porti presenti sul territorio nazionale suddivise per regione- anno 2017 (fonte ISTAT)**

Territorio [Italia]					
Selezione periodo		2017			
Indicatori	merce sbarcata - tonnellate (migliaia)	merce imbarcata - tonnellate (migliaia)	merce imbarcata e sbarcata - tonnellate (migliaia)	numero navi arrivate	stazza lorda navi arrivate - tonnellate (migliaia)
<b>Regione italiana</b>					
Italia	304245	170920	475164	414456	2601799
Liguria	47386	31377	78763	11758	423984
Veneto	20143	6156	26299	4013	74196
Friuli-Venezia Giulia	53254	8030	61284	3114	74293
Emilia-Romagna	23363	5773	29166	3361	48847
Toscana	19038	14167	33204	42451	327251
Marche	5730	4190	9920	2215	52142
Lazio	10393	3840	14233	7802	152361
Abruzzo	1151	210	1361	447	4005
Molise	14	190	204	834	1261
Campania	14749	9608	24557	119135	288731
Puglia	23527	13139	36666	7610	109231
Calabria	15069	14976	30045	39792	246900
Sicilia	39546	36828	76374	100229	419639
Sardegna	25659	22080	47739	67226	353948
Italy, not allocated	5193	156	5349	4469	25108

**Tab. 5: Merci imbarcate e sbarcate (migliaia tonnellate/anno) dai principali porti presenti sul territorio regionale - anno 2017 (fonte ISTAT)**

Selezione periodo		2017							
Indicatori	mercato sbarcata - tonnellate (migliaia)	mercato imbarcata - tonnellate (migliaia)	mercato imbarcata e sbarcata - tonnellate (migliaia)				tutte le voci		
			contenitori	rinfusa liquida	rinfusa solida	ro ro		altro carico	
Paese di origine o Porto di imbarco e destinazione		Tutto il carico							
Tipo di carico		tutte le voci	contenitori	rinfusa liquida	rinfusa solida	ro ro	altro carico	tutte le voci	
Mondo	Augusta	11956	9139	23	20370	591	7	103	21095
	Catania	3929	2161	189	0	362	5538	1	6090
	Gela	227	894	-	1122	-	-	-	1122
	Messina	3801	3099	0	-	4	6891	4	6900
	Milazzo	6803	10563	-	17211	105	10	40	17365
	Palermo	5281	3755	160	1722	159	6736	260	9036

dovuta prevalentemente alla riduzione dei solfati.

### IMPATTO DEL TRASPORTO MARITTIMO SULLA SALUTE UMANA

Nel 2007 Corbett e coautori [2] hanno stimato l'effetto globale delle emissioni delle navi sulla salute, concludendo che queste sono responsabili di circa 60.000 morti annuali per malattie cardiopolmonari e tumori polmonari, e che la maggior parte dei decessi sono localizzati nelle zone costiere in Europa e nell'Asia dell'est e del sud. In uno studio più recente, Liu e coautori [38] hanno stimato che le emissioni delle navi potrebbero causare 4.500-37.500

decessi all'anno nell'Asia dell'est, mentre Winebrake e coautori [39] hanno evidenziato che l'utilizzo di combustibili con un tenore di zolfo al 0.5 % potrebbe evitare 33.500 morti premature all'anno.

D'altra parte, Oeder e coautori [40] hanno rilevato che anche l'utilizzazione di combustibili a basso tenore di zolfo potrebbe causare importanti effetti sulla salute. In questo studio gli autori hanno sottoposto celle polmonari umane in vitro a fumi esausti generati dal motore di una nave alimentato sia ad oli combustibili ad alto tenore di zolfo (HFO) che a diesel a basso tenore di zolfo. Le emissioni nel caso del HFO contenevano una concentrazione più elevata di composti tossici, come metalli e IPA, e di particolato, mentre nel caso

**Tab. 6: Passeggeri imbarcati e sbarcati (migliaia/anno) dai principali porti presenti sul territorio regionale – anno 2017 (fonte ISTAT)**

Territorio		Italia		
Forma di navigazione		tutte le voci		
Selezione periodo		2017		
Indicatori		passeggeri sbarcati (migliaia)	passeggeri imbarcati (migliaia)	passeggeri imbarcati e sbarcati (migliaia)
<b>Paese di origine o destinazione</b>	<b>Porto di imbarco e sbarco</b>			
Mondo	Favignana	398	359	756
	Lipari	156	73	229
	Messina	4679	4572	9250
	Milazzo	223	232	454
	Palermo	671	680	1351
	Trapani	444	506	950
	Vulcano Porto	189	305	494

del diesel, una maggiore concentrazione di carbonio elementare. Gli studi hanno mostrato che le emissioni, nel caso del combustibile a basso tenore di zolfo, potrebbero potenzialmente avere una tossicità persino maggiore rispetto a quelli generati dall'utilizzo del HFO, a causa del contenuto in carbone elementare. Gli autori, pertanto, concludevano il lavoro suggerendo l'opportunità di ridurre le emissioni di carbonio elementare. Risultati simili venivano inoltre riportati da Sapcaru e coautori nel 2016 [41].

### CONTRIBUTO DEL SETTORE NAVALE SULLE EMISSIONI NELLA REGIONE SICILIANA E PIANO DI TUTELA DELLA QUALITÀ DELL'ARIA

La Sicilia è caratterizzata da un sistema portuale particolarmente sviluppato e diversificato. I porti siciliani sono interessati da un traffico merci via nave molto rilevante tanto da classificare la Sicilia al primo posto per migliaia di tonnellate di merce imbarcata e al secondo posto, dopo la Liguria per migliaia di tonnellate di merce sbarcata nel 2017 (Tab. 4).

I porti sono classificati in base al traffico merci: porti monoprodotto, polivalenti e generici. I porti di Palermo e Catania sono polivalenti mentre i porti di Augusta, Gela e Milazzo sono essenzialmente monoprodotto essendo interessati dal traffico navale di prodotti petrolchimici. Il trasporto

merci vede come principali porti quelli di Augusta e Milazzo (a seguito dell'attività riconducibile alle aree industriali) e quello di Palermo (Tab. 5) mentre il trasporto passeggeri è concentrato nei porti di Messina, Palermo e Trapani e stagionalmente nei porti che collegano le isole minori (Tab. 6).

Secondo quanto previsto dal “Piano Strategico Nazionale della Portualità e della Logistica” del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 2014, alcuni porti siciliani saranno oggetto di sviluppo, in particolare per quanto concerne il traffico delle navi traghetto (traffico Ro-Ro), il trasporto petrolifero/energetico del porto di Augusta, il cabotaggio nazionale (es. Ravenna–Catania, le linee sul Tirreno ed i collegamenti con le isole) e quello internazionale.

Nel 2015 è stato pubblicato l'aggiornamento dell'Inventario Regionale delle Emissioni per l'anno 2012 della Regione Siciliana (<https://www.arpa.sicilia.it/temi-ambientali/aria/inventario-delle-emissioni/>) elaborato da ARPA Sicilia in collaborazione con la Techne Consulting in conformità ai criteri previsti nell'Appendice V “Criteri per l'elaborazione degli inventari delle emissioni”, che fa esplicito riferimento al “EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook - 2013”. Per la stima delle emissioni dalla navigazione nei porti è stato utilizzato il modello AirShips.com. Le sostanze prese in considerazione sono state:

- inquinanti principali: CO, COV, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>
- metalli pesanti: As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Se, Zn
- gas climalteranti: CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O
- microinquinanti: PCDD-F, PCB, HCB.

La metodologia per la stima delle emissioni si basa sulla stima dei consumi di combustibile in base alla classe di propulsore ed alla potenza installata sulla nave.

I risultati ottenuti a livello regionale mostrano che nel 2012 le emissioni da porti e aeroporti sono state responsabili del 12% delle emissioni complessive di ossidi di azoto e del 2,5% e del 3% delle emissioni complessive, escluse quelle dovute agli incendi, rispettivamente di PM<sub>10</sub> e di PM<sub>2,5</sub>. Tale contributo non risulta aver subito variazioni significative rispetto a quello stimato per gli anni 2005 e 2007.

Nelle zone dove si sono registrati superamenti dei valori limite fissati dal D.Lgs. 155/2010 per il PM<sub>10</sub> e l'NO<sub>2</sub> sono stati condotti degli approfondimenti dell'Inventario delle emissioni per valutare il contributo delle diverse sorgenti emissive (<https://www.arpasicilia.it/temi-ambientali/aria/il-piano-regionale-di-tutela-della-qualita-dellaria/>). Da tali studi è emerso che, il porto di Palermo contribuisce al 17% delle emissioni di NO<sub>x</sub>, del 3% delle emissioni di PM<sub>10</sub> e del 4% delle emissioni di PM<sub>2,5</sub> rispetto alle emissioni complessive del Comune di Palermo. I porti di Augusta, Milazzo e Gela sono responsabili del 10% delle emissioni di NO<sub>x</sub> e del 4% delle emissioni di PM<sub>10</sub> e del 6% delle emissioni di PM<sub>2,5</sub> e del 3,5% delle emissioni di SO<sub>2</sub> rispetto alle emissioni complessive della zona Aree Industriali.

Nell'ambito dell'elaborazione del Piano Regionale di Tutela della Qualità dell'Aria sono state stimate le emissioni in atmosfera dai differenti settori in proiezione per gli anni 2017, 2022 e 2027 partendo dagli strumenti di pianificazione e programmazione per ciascun settore.

Per quanto riguarda il traffico navale partendo dalle previsioni del Piano Strategico Nazionale della Portualità e della Logistica, assumendo i valori inferiori degli intervalli di sviluppo proposti, integrato con la pianificazione portuale ed i progetti di ampliamento delle infrastrutture portuali a livello regionale, si è stimato un aumento dei traffici navali a livello regionale del 18% al 2017, del 25% al 2022 e del 32% al 2027. Ciò comporterà un incremento delle emissioni di ossidi di azoto (+8,2% al 2017, +9,1% al 2022 e 9,3% al 2027) e di particolato PM<sub>10</sub> (8,7% al 2017, 5,9% al 2022 e 4,4% al 2027) nel Comune di Palermo valutato sulla base delle stime di aumento del traffico navale nel porto di Palermo e un incremento delle emissioni di ossidi di azoto (+6,7% al 2017, 8,2% al 2022 e 9,9% al 2027) e di particolato PM<sub>10</sub> (9% al 2017, 9,8% al 2022 e 10,5% al 2027) nella zona Aree Industriali derivanti dalle stime di aumento del traffico navale soprattutto nel porto di Augusta.

Il Piano di Tutela della qualità dell'Aria della Regione Sicilia, approvato con Deliberazione di Giunta n. 268 del 18/07/2018 ([http://pti.regione.sicilia.it/portal/page/portal/PIR\\_PORTALE/PIR-LaStrutturaRegionale/PIR\\_Assessoratoregionaledelterritorioedellambiente/PIR\\_DipTerritorioAmbiente/PIR\\_Infodocumenti/PIR\\_Trasparenzavalutazioneemerito/PIR\\_Informazioniambientali/PIR\\_Monitoraggio/PIR\\_Aria](http://pti.regione.sicilia.it/portal/page/portal/PIR_PORTALE/PIR-LaStrutturaRegionale/PIR_Assessoratoregionaledelterritorioedellambiente/PIR_DipTerritorioAmbiente/PIR_Infodocumenti/PIR_Trasparenzavalutazioneemerito/PIR_Informazioniambientali/PIR_Monitoraggio/PIR_Aria)) individua misure di riduzione delle emissioni tali da incidere sui fattori di pressione antropici che, sulla base dei dati dell'Inventario Regionale delle Emissioni, contribuiscono in maniera significativa allo stato della qualità dell'aria. In particolare, per la riduzione delle emissioni dai porti, il Piano prevede interventi di allaccio delle navi alla rete elettrica di terra nei porti di Palermo, Catania ed Augusta con riduzione delle emissioni di NO<sub>x</sub> pari al 30% al 2027 e 15% al 2022 e conseguente riduzione anche di emissione di particolato, metalli pesanti, SO<sub>2</sub> e composti organici volatili.

## NOTE BIBLIOGRAFICHE

- [1] Becagli, S., Anello, F., Bommarito, C., Casola, F., Calzolari, G., Di Iorio, T., di Sarra, A., Gómez-Amo, J. L., Lucarelli, F., Marconi, M., Meloni, D., Monteleone, F., Nava, S., Pace, G., Severi, M., Sferlazzo, D.M., Traversi, R., Udisti, R., Constraining the ship contribution to the aerosol of the central Mediterranean. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 2067–2084 (2017)
- [2] Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., and Lauer, A., Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment. *Environ. Sci., Technol.*, 41, 8512–8518 (2007).
- [3] Derwent, R., Stevenson, D. S., Doherty, R. M., Collins, W. J., Sanderson, M. G., Amann, M., and Dentener, F., The contribution from ship emissions to air quality and acid deposition in Europe. *Ambio*, 34, 54–59 (2005)
- [4] Lauer, A., Eyring, V., Hendricks, J., Jöckel, P., and Lohmann, U., Global model simulations of the impact of ocean-going ships on aerosols, clouds, and the radiation budget. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5061–5079 (2007).
- [5] Coakley Jr., J. A., Walsh, C. D., Limits to the aerosol indirect radiative effect derived from observations of ship tracks. *J. Atmos. Sci.*, 59, 668–680, (2002).
- [6] Devasthale, A., Krüger, O., and Graßl, H., Impact of ship emissions on cloud properties over coastal areas. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02811 (2006).
- [7] Eyring, V., Köhler, H.W., Van Aardenne, J., Lauer, A., Emissions from international shipping: 1. The last 50 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110, 1984-2012 (2005).
- [8] Eyring, V., Isaksen, I.S.A., Berntsen, T., Collins, W.J., Corbett, J.J., Endresen, O., Grainger, R.G., Moldanova, J., Schlager, H., Stevenson, D.S., Transport impacts on atmosphere and climate: shipping. *Atmospheric Environment* 44, 4735–4771 (2010).
- [9] Yan, F., Winijkul, E., Streets, D.G., Lu, Z., Bond, T.C., Zhang, Y., Global emission projections for the transportation sector using dynamic technology modelling. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5709–5733 (2014).
- [10] Endresen, Ø., Sørsgård, E., Sundet, J.K., Dalsøren, S.B., Isaksen, I.S., Berglen, T.F., Gravr, G. Emission from international sea transportation and environmental impact. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 1984-2012 (2003)
- [11] De Meyer, P., Maes, F., Volckaert, A., Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaport. *Atmospheric Environment* 42, 196–206 (2008)
- [12] Micco, A. and Pérez, N., 2001. Maritime transport costs and port efficiency, edited by: Bank, I.-A. D., Inter-american Development Bank, Santiago de Chile, 50 (2001).
- [13] Grewal, D. and Haugstetter, H. Capturing and sharing knowledge in supply chains in the maritime transport sector: critical issues. *Mar. Policy Manage.*, 34, 169–183 (2007).
- [14] Lack, D.A., Cappa, C.D., Langridge, J., Bahreini, R., Buffaloe, G., Brock, C., Cerrully, K., Coffman, D., Hayden, K., Holloway, J., Lerner, B., Massoli, P., Li, S.M., McLaren, R., Middlebrook, A.M., Moore, R., Nenes, A., Nuaaman, I., Onasch, T.B., Peischl, J., Perring, A., Quinn, P.K., Ryerson, T., Schwartz, J.P., Spackman, R., Wofsy, S.C., Worsnop, D., Xiang, B., Williams, E. Impact of fuel quality regulation and speed reductions on shipping emissions: implications for climate and air quality. *Environ. Sci. Technol.* 45, 9052-9060 (2011).
- [15] Burel, F., Taccani, R., Zuliani, N. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy*, 57, 412–420 (2013).
- [16] Winkel, E., Weddige, U., Johnsen, D., Høna, V. Papaefthimiou, S. Shore Side Electricity in Europe: Potential and environmental benefits. *Energy Policy*, 88, 584–593 (2016)
- [17] Zhang, F., Chen, Y., Chen, Q., Feng, Y., Shang, Y., Yang, X., Gao, H., Tian, C., Li, J., Zhang, G., Matthias, V., Xie, Z. Real-World Emission Factors of Gaseous and Particulate Pollutants from Marine Fishing Boats and Their Total Emissions in China. *Environ. Sci. Technol.* 52, 4910–4919 (2018).
- [18] Moldanova, J., Fridell, E., Popovicheva, O., Demirdjian, B., Tishkova, V., Faccinnetto, A., Focsa, C. Characterization of particulate matter and gaseous emissions from a large ship diesel engine, *Atmospheric environment*, 43, 2632. (2009)

- [19] Popovicheva, O., Kireeva, E., Shonija, N., Zubareva, N., Persiantseva, N., Tishkova, V. Demirdjian, B., Moldanová, J., Mogilnikov, V. Ship particulate pollutants: Characterization in terms of environmental implication. *J. Environ. Monit.* 11, 2077–2086 (2009).
- [20] Corbin, J.C., Mensah, A.A., Pieber, S.M., Orasche, J., Michalke, B., Zanatta, M., Czech, H., Massabò, D., Buatier de Mongeot, F., Mennucci, C., El Haddad, C., Kumar, N.K., Stengel, B., Huang, Y., Zimmermann, R., Prévôt, A.S.H., Gysel, M. Trace Metals in Soot and PM<sub>2.5</sub> from Heavy-Fuel-Oil Combustion in a Marine Engine. *Environ. Sci. Technol.*, 52, 6714–6722 (2018).
- [21] Zhou, J., Zhou, S., Zhu, Y. Characterization of Particle and Gaseous Emissions from Marine Diesel Engines with Different Fuels and Impact of After-Treatment Technology. *Energies*, 10, 1110–1123 (2017).
- [22] Zetterdahl, M., Moldanova, J., Pei, X., Pathak, R. K., Demirdjian, B. Impact of the 0.1% fuel sulfur content limit in SECA on particle and gaseous emissions from marine vessels, *Atmospheric Environment*, 14, 338–345 (2016).
- [23] Sippula, O., Stengel, B., Sklorz, M., Streibel, T., Rabe, R., Orasche, J., Lintelmann, J., Michalke, B., Abbaszade, G., Radischat, C., Gröger, T., Schnelle-Kreis, J., Harndorf, H., Zimmermann, R.. Particle Emissions from a Marine Engine: Chemical Composition and Aromatic Emission Profiles under Various Operating Conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 48, 11721–11729 (2014).
- [24] Schembari, C., Cavalli, F., Cuccia, E., Hjorth, J., Calzolari, G., Pérez, N., Pey, J., Prati, P., Raes, F. Impact of a European directive on ship emissions on air quality in Mediterranean harbours. *Atmospheric Environment* 61, 661–669 (2012)
- [25] Jonsson A.M., Westerlund J., Hallquist M. Size-resolved particle emission factors for individual ships. *Geophys Res Lett*, 38, L13809–L13809 (2011).
- [26] Winnes, H., Fridell, E. Particle Emissions from Ships: Dependence on Fuel Type. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 59, 1391–1398 (2009).
- [27] Streibel T, Schnelle-Kreis J, Czech H, Harndorf H, Jakobi G, Jokiniemi J, Karg E, Lintelmann J, Matuschek G, Michalke B, Müller L, Orasche J, Passig J, Radischat C, Rabe R, Reda A, Rüger C, Schwemer T, Sippula O, Stengel B, Sklorz M, Torvela T, Weggler B, Zimmermann R., Aerosol emissions of a ship diesel engine operated with diesel fuel or heavy fuel oil, *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 10976–10991 (2017).
- [28] Viana, M., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X., Moreno, T., Santos, S.G.D., Hecce, M.D., Fernández-Patier, R.. Chemical tracers of particulate emissions from commercial shipping. *Environmental Science and Technology* 43, 7472–7477 (2009).
- [29] Becagli, S., Sferlazzo, D.M., Pace, G., Sarra, A.d., Bommarito, C., Calzolari, G., Ghedini, C., Lucarelli, F., Meloni, D., Monteleone, F., Severi, M., Traversi, R., Udisti, R., Evidence for ships emissions in the Central Mediterranean Sea from aerosol chemical analyses at the island of Lampedusa. *Atmospheric, Chemistry and Physics Discussion* 11, 29915–29947 (2012).
- [30] Agrawal, H., Malloy, Q.G.J., Welch, W.A., Miller, J.W., Cocker, D.R., In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel. *Atmospheric Environment* 42, 5504–5510 (2008).
- [31] Viana, M., Hammingh, P., Colette, A., Querol, X., Degraeuwe, B., de Vlieger, I., van Aardenne, J., Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe, *Atmospheric Environment*, 90, 96–105 (2014).
- [32] Nigam, A., Welch, W., Wayne Miller, J., Cocher III, D.R., Effect of fuel sulphur content and control technology on PM emission from ship's auxiliary engine. In: *Proceedings of the International Aerosol Conference*, St. Paul, USA, pp. 1531–1532 (2006).
- [33] Mazzei, F., D'Alessandro, A., Lucarelli, F., Nava, S., Prati, P., Valli, G., Vecchi, R., Characterization of particulate matter sources in an urban environment. *Science of the Total Environment* 401, 81–89 (2008).
- [34] Pandolfi, M., Gonzalez-Castanedo, Y., Alastuey, A., Rosa, J.d.l., Mantilla, E., Campa, A.S.d.l., Querol, X., Pey, J., Amato, F., Moreno, T., Source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at multiple sites in the strait of

- Gibraltar by PMF: impact of shipping emissions. *Environmental Science and Pollution Research* 18, 260-269 (2011).
- [35] Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., Quante, M., The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions. *Environmental Pollution*, 158, 2241-2250 (2010).
- [36] Tao, L., Fairley, D., Kleeman, M.J., Harley, R.A., Effects of switching to lower sulfur marine fuel oil on air quality in the San Francisco Bay area. *Environ. Sci. Technol.* 47, 10171-10178 (2013).
- [37] Kotchenruther, R.A., The effects of marine vessel fuel sulfur regulations on ambient PM<sub>2.5</sub> along the west coast of the U.S. *Atmos. Environ.* 103, 121-128.H (2015).
- [38] Liu, H., Fu, M., Jin, X., Shang, Y., Shindell, D., Faluvegi, G., Shindell, C., He, K., Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia. *Nature Climate Change*, 6, 1037-1041 (2016).
- [39] Winebrake, J.J., Corbett, J.J., Green, E.H., Lauer, A., Eyring, V., Mitigating the health impacts of pollution from oceangoing shipping: an assessment of low-sulfur fuel mandates. *Environ. Sci. Technol.* 43 (13), 4776-4782 (2009).
- [40] Oeder, S., Kanashova, T., Sippula, O., Sapcarriu, S.C., Streibel, T., Arteaga-Salas, J.M., Passig, J., Dilger, M., Paur, H.-R., Schlager, C., Mülhopt, S., Diabate, S., Weiss, C., Stengel, B., Rabe, R., Harndorf, H., Torvela, T., Jokiniemi, J.K., Hirvonen, M.-R., Schmidt-Weber, C., Traidl-Hoffmann, C., BeruBe, K.A., Włodarczyk, A.J., Michalke, B., Krebs, T., Prevot, A.S.H., Kelbg, M., Tiggesbaumker, J., Karg, E., Jakobi, G., Scholtes, S., Schnelle-Kreis, J., Lintelmann, J., Matuschek, G., Sklorz, M., Klingbeil, S., Orasche, J., Richthammer, P., Müller, L., Elsassner, M., Reda, A.A., Groger, T.M., Weggler, B., Czech, H., Rüger, C.P., Abbaszade, G., Radischat, C., Hiller, K., Buters, J.T.M., Dittmar, G., Zimmermann, R., Particulate matter from both heavy fuel oil and diesel fuel shipping emissions show strong biological effects on human lung cells at realistic and comparable in vitro exposure conditions. *PLoS One* 10, 1932-6203 (2015).
- [41] Sapcarriu, S.C., Kanashova, T., Dilger, M., Diabate, S., Oeder, S., Passig, J., Radischat, C., Buters, J., Sippula, O., Streibel, T., Paur, H.R., Schlager, C., Mülhopt, S., Stengel, B., Rabe, R., Harndorf, H., Krebs, T., Karg, E., Groger, T., Weiss, C., Dittmar, G., Hiller, K., Zimmermann, R.,. Metabolic profiling as well as stable isotope assisted metabolic and proteomic analysis of RAW 264.7 macrophages exposed to ship engine aerosol emissions: different effects of heavy fuel oil and refined diesel fuel. *PLoS One* 11 (2016).
- [42] Xiao, Q., Li, M., Liu, H., Fu, M., Deng, F., Lv, Z., Man, H., Jin, X., Liu, S., He, K., Characteristics of marine shipping emissions at berth: profiles for particulate matter and volatile organic compounds. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 9527-9545 (2018).
- [43] Bläsing, M., Kistler, M., Lehndorff, E., Emission fingerprint of inland navigation vessels compared with road traffic, domestic heating and ocean going vessels. *Organic Geochemistry*, 99, 1-9 (2016).
- [44] Eichler, P., Müller, M., Rohmann, C., Stengel, B., Orasche, J., Zimmermann, R., Wisthaler, A., Lubricating oil as a major constituent of ship exhaust particles. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 4, 54-58 (2017).